

点拡がり関数に基づく半透明物体の法線推定

柴田 青^{1,a)} 岡部 孝弘^{1,b)}

概要：半透明物体に入射した光は、表面下散乱により入射位置とは異なる位置から出射するため、滲んで見える。そのため、パターン光投影法や照度差ステレオによる半透明物体の3次元形状復元・法線推定は容易ではない。そこで本稿では、表面下散乱の特性を記述する点拡がり関数（PSF）に基づく法線推定手法を提案する。提案手法では、その表面下散乱特性が等方的なPSFで記述される半透明物体を対象として、視線方向から観察したときの見かけのPSFが法線方向に依存して歪むことを手掛かりにして法線を推定する。また、法線推定に曖昧さがあることから、深度推定と組み合わせることで曖昧さを解決する。実画像を用いた実験を行い、提案手法の有効性を示す。

キーワード：半透明物体、点拡がり関数、法線推定、深度推定

Surface Normal Estimation of Translucent Objects Based on Point Spread Functions

1. はじめに

物体やシーンの形状を画像から復元する3次元復元技術は、コンピュータビジョンの重要な研究テーマの一つである。特に、非接触による3次元形状復元は、外観検査、医療、文化財の保存・調査などのさまざまな分野で応用され、需要が高まっている。

不透明物体においては、物体表面上のある点に入射した光は、同じ点から出射する。したがって、不透明物体の光学的特性は、物体表面上のある点への入射光の方向 (θ_i, ϕ_i) とその点からの出射光の方向 (θ_o, ϕ_o) を用いて記述され、この4次元の関数 $f_{BRDF}(\theta_i, \phi_i, \theta_o, \phi_o)$ は双方向反射率分布関数（BRDF）と呼ばれる。不透明物体の光学的特性が入射光に依存して観測されることに基づき、反射光の明るさに基づいて法線を推定する照度差ステレオ法[1]や、構造化光に基づいて3次元座標を求めるアクティブステレオ法[2]等の形状復元手法が提案されている。

一方、半透明物体においては、物体表面のある点に入射した光が、物体内部に深く浸透して散乱を繰り返したのち、入射した位置とは異なる点から出射する表面下散乱が

観測される。したがって、半透明物体の光学的特性は、入射光の入射位置 (x_i, y_i) と入射方向 (θ_i, ϕ_i) 、および、出射光の出射位置 (x_o, y_o) と出射方向 (θ_o, ϕ_o) を用いて記述され、この8次元の関数 $f_{BSSRDF}(x_i, y_i, \theta_i, \phi_i, x_o, y_o, \theta_o, \phi_o)$ は双方向散乱面反射率分布関数（BSSRDF）と呼ばれる。言い換えると、半透明物体では表面下散乱のために入射光が滲む。物体表面上の1点に入射した光が周囲に拡がる様子は、点拡がり関数（PSF）で記述される。そのため、表面下散乱の影響により、照度差ステレオにより推定した法線が平滑化されたり、アクティブステレオ等の深度推定においては特徴点の対応付けが難しくなったりするため、半透明物体の高精度な形状復元は容易ではない。

本稿では、PSFを活用した半透明物体の法線推定法を提案する。提案手法では、半透明物体が等方的なPSFを持つとき、カメラ方向から見たときの面の向きに依存して、見かけのPSFが非等方的になることに着目する。具体的には、見かけのPSFの歪みの方向と大きさから、法線の方角と天頂角を求める方法を提案する。また、推定した法線は曖昧さをもつため、深度推定を組み合わせ、深度と合致する方を採用することで、法線を一意に推定する。

¹ 九州工業大学
Kyushu Institute of Technology

a) p231047s@mail.kyutech.jp

b) okabe@ai.kyutech.ac.jp

2. 関連研究

2.1 不透明物体の形状復元

コンピュータビジョン分野における3次元復元は、物体の立体形状を画像から復元する技術のことである。これまでにさまざまな手法が提案されており、カメラを複数台用いたり、レーザー光やプロジェクタによる構造光などの光源を工夫したりしている。特に明るさ解析に基づく形状復元手法は、古くからかなり研究されており、Shape-from-intensity と総称される。拡散反射 [1], [3] や鏡面反射 [4], [5] などのさまざまな光学現象が手掛かりとして使われてきた。これらの手法は非接触で形状を復元できるという共通の特徴があり、また、それぞれのシーン・状況に応じて適した手法を選択する必要がある。

ステレオ法は、複数のカメラで撮影された画像に含まれる対象の奥行き情報を、カメラの特性および位置関係から推定する手法である。このとき、2つのカメラと対象点がエピポーラ平面上にあるため、対象点の奥行きはカメラ1およびカメラ2で撮影される画像の視差から推定することができる。

また、2台のカメラのうち1台を光を発する装置に置換して計測を行うアクティブステレオ法は、3次元計測手法としてよく用いられている。このとき、光を発する装置として、レーザーおよびプロジェクタがよく使われる。また、プロジェクタの投影光の種類によってさまざまな手法に分類することができ、スポット光投影法や光切断法、位相シフト法などが提案されている。一般にアクティブステレオ方式による3次元計測では、事前に計測装置の厳密な校正が必要である。光パターン投影法によるプロジェクタ・カメラシステムにおいては、プロジェクタとカメラの内部パラメータおよび、計測装置間の外部パラメータが必要となる。特にプロジェクタはその性質上、画像をデータとして取得できないため内部校正には3次元計測で得られた対応点を使用する。

しかし、これらの手法は一般に不透明物体を仮定しており、半透明物体に適用した場合に推定精度が低下するといった問題点が生じる。これは、表面下散乱の影響によって光の経路が非常に複雑となり、また明るさも平滑化されるために対応付けが困難になるからである。

2.2 半透明物体の形状復元

表面下散乱は、入射した光が物体内部で散乱を繰り返したのち、一般に入射位置とは異なる位置から出射する。そのため、ある点の観測輝度は、その点以外の点から入射した表面下散乱光の影響を受けるため、全体的にコントラストが低くなってしまふ。これが物体表面がなめらかに見える原因であり、物体の形状と陰影を直接対応付けることが

難しくなる原因でもある。厳密な表面下散乱のモデルは複雑になりがちであるが、不透明物体に近い半透明物体における表面下散乱は、散乱フィルタと拡散反射の畳み込み演算により近似的に記述される。このとき、散乱フィルタは点拡がり関数 (PSF) と呼ばれる [9]。

これまでに、半透明物体の光学的特性を推定する手法として、PSF が回転対称であると仮定し、正弦波光などを投影することによって等方的な PSF を推定する手法が提案されている [10], [11]。また、表面下散乱による半透明物体の見えを制御する手法として、半透明物体のモデリング [7], UV 印刷による半透明性の制御 [8] などが提案されている。

さらに、半透明物体を対象とした3次元形状復元手法として、散乱のために平滑化された法線の鮮鋭化 [6] や半透明物体の単一散乱に基づく計測 [12] がある。本手法では、等方的な PSF を仮定し、観測される非等方的な PSF を手掛かりとすることで、半透明物体の3次元形状復元における新たなアプローチを提案する。

3. 提案手法

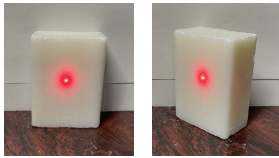
本手法は被写体に対しカメラとプロジェクタを1台ずつ配置したプロジェクタ・カメラシステムを用いる。これにより、プロジェクタで光源を制御しながらカメラでその様子を観測することができる。

まず、プロジェクタで半透明物体の各点を照らすことで PSF を観測し、得られた PSF の歪みの向きや大きさをもとに法線を推定する。本研究では、不透明に近い半透明物体を対象とし、半透明物体が等方的な PSF を持ち、PSF の形、より厳密には、BSSRDF が入射光や出射光に依存しないと仮定する。このとき、カメラに対する面の向きによって見かけの PSF がその方向に対して縮んで見えることに着目する。ここで得られる法線は曖昧性を持つため、法線を一意に決定することができない。

次に、半透明物体の奥行き推定を行う。これにより、先ほど推定した2つの法線の候補のうち、深度と合致する方を採用することで法線を一意に決定する。奥行き推定では、カメラとプロジェクタの両方のキャリブレーションを行い、得られたパラメータをもとに三角測量を行うことによって物体の任意の点における3次元位置 (奥行き) を推定する。具体的には、プロジェクタで半透明物体の任意の点を照射し、その撮影画像とキャリブレーション結果をもとにカメラの光学中心、および、プロジェクタの投影中心からその点に向かうベクトルを求め、それらの交点を求めることで投影点の3次元位置を獲得する。

3.1 見かけの PSF に基づく法線推定

半透明物体に光を照射した際、図1のように面の向きに依存して PSF が歪む。よって、見かけの PSF をもとに法線の推定を行う。法線は3次元のベクトルであり、方位角



(a) 正面 (b) 斜面

図 1 面の向きの PSF の歪み

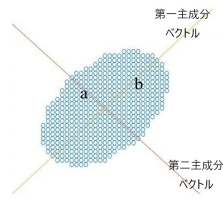


図 2 見かけの PSF の主成分分析

ϕ および天頂角 θ の組で表現することができる。このとき、方位角は $0 \leq \phi \leq 2\pi$ 、天頂角は $0 \leq \theta \leq \pi/2$ の範囲である。本手法では、見かけの PSF に対して主成分分析を行い、方位角 ϕ と天頂角 θ の各々について推定することで法線を獲得する。

本手法では、撮影された見かけの PSF に対し画素値を重みとした主成分分析を行うことで、PSF の歪みについて解析する。具体的には、図 2 に示すように、PSF の最も分散の大きいところが第一主成分、それに直交するもののうち分散が最も大きいものが第二主成分として獲得できる。ここで、PSF が等方的であると仮定しているため、この PSF の歪みは面の向きに依存して縮んでいるといえる。

まず、方位角 ϕ は PSF の歪みの向き、つまり、第二主成分と画像座標系の x 軸のなす角によって求められる。なお、ここで考えられる方位角 ϕ は π の曖昧性をもつことに注意が必要である。

次に、天頂角 θ は PSF の歪みの大きさ、つまり、PSF の第一主成分および第二主成分における長さに依存する。つまり、PSF の第二主成分方向（短軸）の長さを a 、第一主成分方向（長軸）の長さを b とすると、天頂角 θ は、

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{a}{b} \right) \quad (1)$$

で求めることができる。

最後に、法線ベクトルは方位角 ϕ と天頂角 θ をもとに 3 次元ベクトルへと変換できる。このとき、方位角 ϕ が $\pm\pi$ の曖昧さを持つため、法線の候補が 2 つ求められる。具体的には、推定された 2 つの法線の候補は

$$\mathbf{N} = \begin{cases} (\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \theta) \\ (\sin \theta \cos(\phi + \pi), \sin \theta \sin(\phi + \pi), \cos \theta) \end{cases} \quad (2)$$

となる。そこで、深度情報を組み合わせ、法線の 2 つの候補のうち、深度と合致する方を採用することで法線を一意に決定する。

3.2 奥行き推定

本手法では、カメラ・プロジェクタ・各投影点の 3 点を用いた三角測量を用いることで奥行きを推定する。具体的には、被写体のある一点をプロジェクタで照らし、その様子をカメラで捉える。このとき、カメラから投影点へのカメラ方向ベクトルと、プロジェクタから投影点へのプロジェクタ方向ベクトルの交点を求めることで投影点の 3 次元位

置を推定する。そのために、カメラとプロジェクタの位置関係を把握する必要があり、カメラとプロジェクタのそれぞれに対してキャリブレーションを行う必要がある。

カメラキャリブレーションでは、異なる位置のチェッカーボードを撮影することで、カメラのレンズ焦点距離などの内部パラメータ、カメラの位置・姿勢を示す外部パラメータなどが求められる。これにより、カメラの光学中心やカメラ座標と画像座標の関係を推定できる。また、プロジェクタキャリブレーションでは、プロジェクタが一点から光を発していると仮定し、2 つの異なる平面に対してチェッカーパターンを投影することで、その対応点の位置関係からプロジェクタの投影中心および平面と投影パターンとの関係を示すホモグラフィ変換を推定できる。

その後、任意の点を照射するパターンを作成し、そのパターンを投影した画像を撮影する。これにより、投影パターンとホモグラフィ変換からプロジェクタ方向ベクトルを、撮影画像における見かけの PSF を主成分分析して得られた中心点を入射位置とみなすことで、カメラ方向ベクトルを獲得する。

最後にカメラ方向ベクトルとプロジェクタ方向ベクトルの交点を求めることで、投影点の 3 次元座標を推定する。ここで、2 直線の交点は線上最近点を用いることで推定する。具体的には、カメラ方向の直線の線上最近点 $\mathbf{p}_1$ とプロジェクタ方向の直線の線上最近点 $\mathbf{p}_2$ をそれぞれ以下のように示す。

$$\mathbf{p}_1 = \mathbf{A} + d_1 \mathbf{n}_1 \quad (3)$$

$$\mathbf{p}_2 = \mathbf{C} + d_2 \mathbf{n}_2 \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{A}$ および $\mathbf{C}$ はそれぞれの直線の始点、すなわち、カメラの光学中心およびプロジェクタの投影中心である。また、 $\mathbf{n}_1$ 、 $\mathbf{n}_2$ は、カメラとプロジェクタの各方向の単位ベクトルである。よって、 $\mathbf{p}_1$ と $\mathbf{p}_2$ の距離が最短となるような d_1 、 d_2 を求めることで 2 直線の交点を求めることができる。最後に、求めた線上最近点 $\mathbf{p}_1$ 、 $\mathbf{p}_2$ の平均を投影点の 3 次元座標として扱う。なお、半透明物体においては、表面下散乱の影響で投影点が滲むため、推定された深度の精度は高くないが、法線の曖昧さを除去するには十分であると考えられる。

3.3 曖昧な法線と深度の統合

以上より、各投影点に対して、2 つの法線の候補および、深度情報が獲得できた。そこで、法線を一意に決定するために、式 (2) に示す 2 つの法線の候補のうち、深度と合致する方を採用することで、法線の曖昧性を解消する。具体的には、深度推定によって物体の 3 次元座標を求めた後、各法線に対し、投影点を通り法線に垂直な平面を求め、その平面から一定の距離に含まれる物体表面の座標が多い方を採用する。

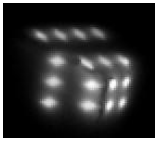


図 3 シーン

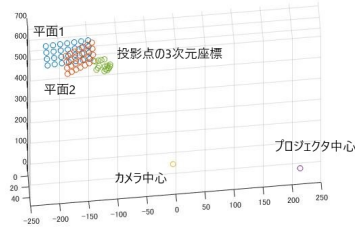


図 4 深度推定結果

4. 実験

まず、カメラとプロジェクタを適切な位置に固定し、カメラキャリブレーションを行った。本研究では MATLAB のカメラキャリブレーションアプリケーションを用いて、20 枚程度のチェッカーパターンを動かしながらカメラで捉え、撮影画像を入力としてカメラパラメータを推定した。その後、2つの平面に対してプロジェクタでチェッカーパターンを投影しカメラで捉えた。本手法では、28 個の特徴点をもとにプロジェクタの投影中心を獲得した。

カメラとプロジェクタの両方のキャリブレーションを行った後、光学的に厚い石鹸を被写体として、表面上の各点を照らした画像を撮影した。図 3 は半透明物体の投影点 (16 点) をまとめたものである。それぞれの点において、カメラ方向ベクトルとプロジェクタ方向ベクトルを推定し、投影点の 3 次元座標を求めた。図 4 は、カメラとプロジェクタの両方のキャリブレーション結果および投影点の 3 次元座標の推定結果をプロットしたものである。

次に、歪んだ PSF に対し主成分分析を行い、半透明物体の各点において法線推定を行った。提案手法のもと、半透明物体に照射した 16 点の投影点に対しそれぞれ曖昧さを持つ法線を求め、先ほど求めた深度情報をもとに法線を一意に決定した。図 5 は、一意に決定した法線ともう一方の法線をプロットしたものである。この結果より、図 3 と比較して、面の向きと法線が比較的合致しており、定性的に良好な結果であると言える。一方、面の境界に関しては推定精度がやや悪く、法線を一意に決定する際に異なる方を選択している部分がある。これは、現在の法線と深度の組み合わせ方では、投影点の数が少なくノイズによる影響を大きく受けていると考えられる。よって、処理方法の変更や投影点を増やした密の推定を行うことで、法線を補間し精度を向上させたりする必要がある。

5. まとめ

本稿では、PSF に基づく半透明物体の法線推定手法を提案した。視線方向によって見かけの PSF が歪むことに着目して法線の候補を得るとともに、奥行き推定を組み合わせることで法線を一意に決定した。推定精度の向上および

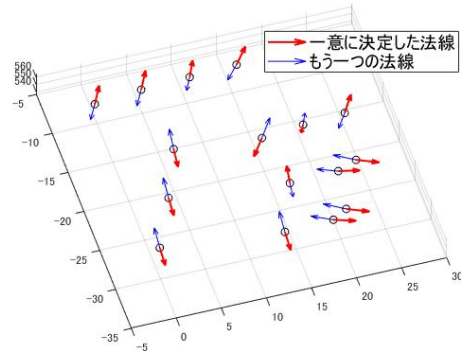


図 5 一意な法線の推定結果

密な推定は今後の課題である。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 JP20H00612, および、JP17H01766 の助成を受けた。

参考文献

- [1] R. Woodham, "Photometric Method For Determining Surface Orientation From Multiple Images", Optical Engineering, Vol.19, No.1, pp.139-144, 1980.
- [2] J. Salvi, J. Pages, and J. Batlle, "Pattern codification strategies in structured light systems", Pattern Recognition, Vol.37, No.4, pp.827-849, 2004.
- [3] B. Horn, "Shape from shading: A method for obtaining the shape of a smooth opaque object from one view", MIT Project MAC Internal Report TR-79 and MIT AI Laboratory Technical Report 232, 1970.
- [4] G. Healey and T. Binford, "Local shape from specularity", Computer Vision, Graphics, and Image Processing, Vol.42, No.1, pp.62-86, 1987.
- [5] A. Sankaranarayanan, A. Veeraraghavan, O. Tuzel, and A. Agrawal, "Specular surface reconstruction from sparse reflection correspondences", In Proc. IEEE CVPR2010, pp.1245-1252, 2010.
- [6] C. Inoshita, Y. Mukaigawa, Y. Matsushita, and Y. Yagi, "Surface normal deconvolution: photometric stereo for optically thick translucent objects", In Proc. ECCV2014, pp.346-359, 2014.
- [7] M. Goesele, H. Lensch, J. Lang, C. Fuchs, and H. Seidel, "DISCO - Acquisition of Translucent Objects", In Proc. SIGGRAPH2004, pp.835-844, 2004.
- [8] T. Takatani, K. Fujita, K. Tanaka, T. Funatomi, and Y. Mukaigawa, "Controlling translucency by UV printing on a translucent object", In Proc. MIRU2018, OS1-L3, 2018.
- [9] A. Munoz, J. Echevarria, F. Seron, and D. Gutierrez, "Convolution-based simulation of homogeneous subsurface scattering", Computer Graphics Forum, Vol.3, No.8, pp.2279-2287, 2011.
- [10] D. Cuccia, F. Bevilacqua, A. Durkin, and B. Tromberg, "Modulated imaging: quantitative analysis and tomography of turbid media in the spatial-frequency domain", Opt. Lett., Vol.30, No.11, pp.1354-1356, 2005.
- [11] M. Sakano, N. Suetake, and E. Uchino, "An estimation of out-of-focus PSF and its application for image restoration", FSS, Vol.21, pp.564-569, 2005.
- [12] C. Inoshita, Y. Mukaigawa, Y. Matsushita, and Y. Yagi, "Shape from single scattering for translucent objects", In Proc. ECCV2012, pp.371-384, 2012.